干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆哈密2018·7·31特大暴雨山洪汇水量估算与应用研究

王梅霞， 张太西， 余行杰， 张连成， 张 旭
（新疆维吾尔自治区气候中心，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：在干旱少雨的山区开展小流域的暴雨山洪预报预警关键技术研究，对防灾减灾意义重大。2018年7月31日新疆哈密北部山区出现特大暴雨，发生罕见的山洪灾害，致使射月沟流域水库漫坝溃口，下游受灾严重。射月沟流域气象观测站点少且缺乏水文监测资料，为客观定量分析射月沟流域大暴雨面雨量、形成的洪水汇水量以及致灾水库过程。通过采用空间插值法和多源融合逐时降水资料(CMPAS)计算了射月沟水库上游面雨量并进行检验分析。根据不同面雨量驱动Floodarea模型得出射月沟水库上游累计汇水量，结果表明：多源融合降水产品估算所得最大洪峰流量和累计汇水量与水利部门事后调查数据较吻合，最大洪峰量为1 756 $m^3·s^{-1}$，精确性达到调查值的95%，射月沟水库上游暴雨山洪总量为$2.64×10^7$ m^3，远超该水库的防洪库容和溢洪道承载能力。

关 键 词： 特大暴雨；面雨量；汇水量；Floodarea模型；哈密

文章编号： 1000－6060(2020)04－0939－07(0939～0945)

在全球气候变暖的背景下，夏季极端降水事件频发，给人民生命财产和社会经济带来极大损失[1－2]，因此，认识地球生态系统演变规律，并从内在机理出发，逐步深入研究，掌握极端降雨引发的暴雨山洪变化规律，及时规避洪涝灾害和防灾减灾都非常重要。在暴雨山洪监测预警方面，西方发达国家起步较早，欧美从20世纪70年代起陆续建立了山洪灾害预报预警系统，基本实现了山洪灾害的实时监测和水文模型的山洪预报预警[3－6]。我国山洪灾害防治起步较晚，近10 a来，我国实施了山洪灾害防治项目建设，初步建成了山洪灾害防御体系[7]，并在监测预警以及应急避险建设取得长足进步，但暴雨山洪突发性强、成灾快、破坏性强、预警预防难度大，山洪灾害仍是我国洪水灾害中导致人员伤亡最主要的灾种之一[8]。

目前，关于不同尺度的洪灾预警预报研究侧重于峰值的预报、洪水过程以及面雨量的预报等方面。MICHAUD等[9]通过中小尺度流域不同类型水文模型的模拟对比表明，降雨输入精度对模拟结果影响较大；张雪松等[10]发现雨量站密度、分布和降雨空间分布变化均会对水文模拟结果产生影响；章国材等[11]基于GIS栅格数据的水动力暴雨洪涝淹没模型，对流域暴雨洪水淹没过程进行淹没模拟，推算出山洪淹没不同等级的风险雨量，取得了与实际较为一致的结果。但是现有的山洪灾害预报预警主要依据实时降雨和水位信息，存在较多空报和预警后来不及避险撤离转移[12]，尤其在山地小流域地区，在气象、水文站点稀缺且分布不均匀的情况下，开展短时山洪预警难度较大，小流域山洪灾害动态预报预警技术仍然是山洪灾害防御急需解决的关键技术问题[13]。因此，通过现代气象监测手段和各种数值降水预报模式，在山洪灾害较严重的地区建立小流域面雨量、汇水量等定量化预警产品既是暴雨山洪灾害预警和灾害风险评估的技术关键所在又是防灾减灾的迫切需求。

暴雨虽然是非常重要的灾害性天气，但是暴雨并不一定会直接造成生命伤亡和财产损失，暴雨造成的灾害是通过暴雨引发的山洪、泥石流等次生灾

收稿日期：2019－10－09； **修订日期：**2020－01－14
基金项目：中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2017009)
作者简介：王梅霞(1990－)，女，助工，硕士，研究方向：气象灾害风险研究. E-mail：wangmeixia_2018@163.com
通讯作者：张太西. E-mail：bztx@tom.com

害，在我国南方绝大数地方当24 h累计降水达到50 mm时并不会造成山洪灾害，但是在北方地质条件和生态环境差的地方，<50 mm的降雨量可能会引发地质灾害或山洪[11]。新疆地形地貌复杂，山脉与盆地相间排列，气候干旱，春夏季多暴雨天气，尤其阿尔泰山北部、昆仑山脉南部以及中天山一带的高山丘陵区多有极端的暴雨天气发生，易形成暴雨山洪造成重大人员伤亡和财产损失[14-15]。2018年7月29日~8月2日上午（北京时间，下同），哈密市北部山区出现强降水天气过程，尤其是7月31日01时~14时，哈密市伊州区至伊吾县山区出现大范围特大暴雨，其范围内射月沟流域的沁城乡小堡、射月沟水库及周边的沁城乡3个自动气象站分别观测到116 mm、105 mm、79 mm的强降水，均突破有记录以来极值；小堡站在31日06时~09时连续3 h雨强超过全国暴雨小时降水强度（16 mm·h^{-1}），降雨强度之大在干旱少雨的西北地区实为罕见（图1，图2），特大暴雨造成小流域内射月沟水库漫坝溃口，下游受灾严重。本文就此次过程，研究山区小流域在气象、水文监测资料不完备的情况下，利用Floodarea

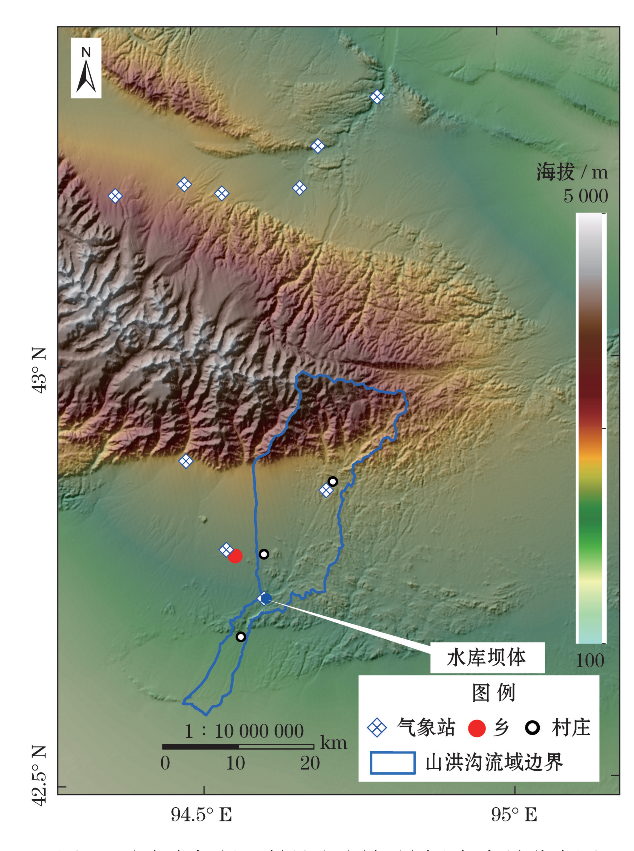


图1　哈密市伊州区射月沟流域及周边气象站分布图

Fig. 1　Weather stations of the Sheyuegou Basin, Yizhou District, Hami City and surrounding region

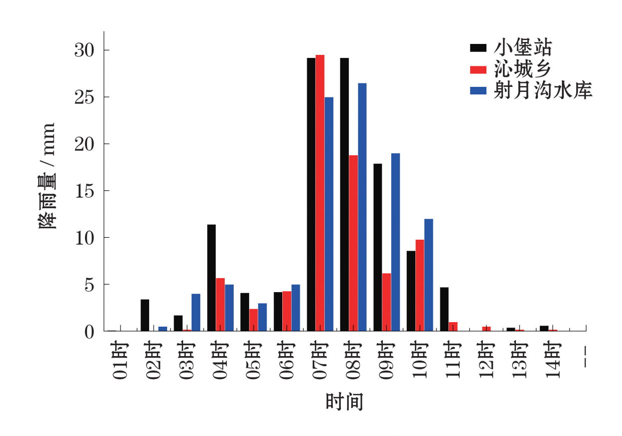


图2　小堡、沁城乡、射月沟水库站逐时雨量图

Fig. 2　Hourly rainfall of the three automatic rainfall stations near Sheyuegou Reservoir on 31st July 2018

模型模拟暴雨洪水致灾射月沟水库的水文过程，通过计算水库上游的面雨量、最大汇水量以及洪水峰值，并结合灾后调查数据分析对比，将探讨水库上游山洪发生的过程以及所产生汇水量对水库造成的威胁，以期加深对山区小流域暴雨山洪形成、发展和致灾演变的理解，为小流域暴雨山洪灾害预警和风险评估提供科学依据和技术参考。

1　资料与方法

1.1　研究区概况

射月沟流域位于新疆哈密东北部山区，为丘陵山地，植被覆盖稀少，土壤蓄水能力差；射月沟水库上游流域面积406 km^2。射月沟水库距离哈密市115 km，该水库总库容6.70×10^6 m^3，溢洪道最大洪峰流量为380 m^3·s^{-1}，最大坝高41 m，大坝长度403 m。

1.2　数据资料

地面降水观测数据由哈密市气象局提供，哈密市伊州区射月沟流域及周边2018年7月31日01时~14时的14个气象观测站的地面观测逐时雨量数据。哈密市伊州区防洪办和水文局提供的射月沟水库雨量站数据（2018年7月31日01时~10时数据）、射月沟水库库容以及水库上游暴雨洪水入库、溢洪、洪水漫坝、溃口时间节点等信息资料。

多源融合降水数据来自于国家气象信息中心（http://www.nmic.cn），该数据资料是基于地面自动气象站与CMORPH卫星反演降水数据、全国雷达拼图定量估测降水数据综合而成的中国区域融合降水分析产品（CMPAS：CMA Multi-source merged Precipitation Analysis System，简称：CMPAS），时空分辨

率分别为1 h、0.05°×0.05°,该数据源的核心算法利用概率密度函数匹配法订正卫星雷达降水的系统偏差,采用贝叶斯模型平均法、最优插值法以及空间降尺度技术形成三源降水融合产品[16-17]。

基础地理信息数据包括1:50 000的数字高程模型(digital elevation model,DEM),空间分辨率25 m,土地利用数据采用2015年遥感解译数据,空间分辨率30 m。

1.3 流域面雨量的计算与获取

由图1给出射月沟流域及其周边气象站分布示意图可知,射月沟流域内气象站非常稀疏,仅有小堡气象观测站(Y6344)和射月沟水库雨量站2个站。作为模拟洪水淹没的面雨量需要考虑表征实际降水强度和分布,为减小面雨量的估算误差,选取了射月沟流域及周边附近总共15个自动气象站点降水资料,采用泰森多边形法(Thiessen)、反距离权重法(Inverse Distance Weighting,IDW)、普通克里金法(Kriging)等3种空间插值法估算射月沟流域面雨量,同时通过多源融合降水数据(CMAPS)获取射月沟水库上游范围内的面雨量。

1.4 模型参数设置

Floodarea模型基于水动力方法,同时考虑了一个栅格周围8个单位,对邻近栅格单元的泄入量由manning-strickler公式[18]计算,坡度由单元之间的最低水位和地形的最高高程之间的差异所决定,对每一个单元都进行计算,位于对角线的单元,以不同的长度算法来计算。不同于静态的洪水演进模拟,Floodarea模型在每个时相的运行过程,即运行时间与相应淹没范围和水深均以栅格形式呈现和储存,直观明了,便以查询,研究证明用以界定洪水淹没范围和预警洪涝风险的效果较好[19-20]。由于本文选择研究区为射月沟水库上游区,不受堤坝、道路、建筑物等对洪水模拟过程的影响,选用Floodarea模型中的暴雨模块(Rainstorm),该模块的输入参数包括逐时面雨量数据、流域DEM、粗糙度(Strickler系数)和最大水流交换率。该模块中输入逐时面雨量数值(单位:mm·h^{-1}),最大交换率值为1%,时间步长为1 h。根据土地利用类型数据改进Strickler系数,在ArcGIS 10.2的平台下利用Reclassify工具,对地表粗糙度重新赋值,得到改进后的射月沟流域粗糙度系数(表1),模型最终的输出结果为从地面开始的淹没水深,其单位同高程模型的单位相同(单位:m)。

表1 不同土地利用类型对应的Strickler系数[21]

Tab. 1 Strickler induce of different types

土地覆盖类型	耕地	草地	水体	居民地	荒漠
Strickler系数	18	50	40	25	33
Manning系数	0.06	0.02	0.03	0.04	0.03

1.5 累计汇水量的计算

在特大暴雨情况下,相关研究表明地表大量的汇水主要来源于大气降水,边坡的渗水影响较小[22],因此本文的累计汇水量仅考虑大气降水。在ArcGIS环境下运行Floodarea模型,输出结果为表示淹没水深的栅格数据,并且可以得到每个时相的洪水淹没范围和洪水历时特征。累计汇水量的计算为假定每个单元格有一个单位的淹没水量,依据水流方向依次计算每个单元格所能积累的水量,计算公式为:

$$V = h \cdot a_{DEM} \times a_{DEM} \qquad (1)$$

式中:V为汇水量(m^3);h为淹没深度(m);a_{DEM}为DEM的空间分辨率(m)。汇水量的大小与洪水淹没深度直接相关,通过Floodarea模型得出淹没深度h后,可根据淹没深度与栅格单元大小的乘积,计算出每个栅格的汇水量,逐时汇水量的计算需相应地减去前1小时的汇水量。

1.6 流域边界提取

流域地理信息关键的一步首先是提取确定流域的范围,即射月沟水库上游的集水面积。在自然流域的情况下,通过ArcGIS扩展模块Arc Hydro Tools实现流域集水面积的提取。整个提取过程如下:(1)原始DEM数据预处理,对流域洼地进行填洼。(2)基于D8算法生成流向。(3)累计流生成。(4)流域出口点生成。(5)通过Batch Sub Watershed Definition生成射月沟水库流域集水面积,在生成的Sub Watershed矢量文件属性表中可得出射月沟水库流域面积为400 km^2(接近实测集水面积406 km^2)。接着利用选取得到的流域边界裁剪Floodarea模型模拟所需的DEM、土地利用数据等。

2 射月沟流域面雨量与汇水量估算及其洪水入库分析

2.1 射月沟水库上游面雨量计算及验证

选取哈密市伊州区射月沟流域周边2018年7月31日01时~14时的10个气象观测站所采集的逐

时雨量数据，分别采用泰森多边形法（Thiessen）、反距离加权法（IDW）和普通克里金法（Kriging）估算射月沟水库上游逐时面雨量。除了上述空间插值所得面雨量外，将获取的多源融合降水分析产品（CMPAS）也作为该流域面雨量数据，4种面雨量结果见表2。

由累计雨量统计结果可知：2019年7月31日01时～14时射月沟水库上游汇水区域平均降水量，泰森多边形法所得的累计面雨量最大，值为109.6 mm。其次是多源融合降水分析产品，累计面雨量为100.7 mm，普通克里金法计算所得的累计面雨量最小，仅为58.7 mm。

表2　射月沟水库上游区每小时面雨量平均值 / mm

Tab. 2　Statistical table of area rainfall per hour in the upper reach of Sheyuegou / mm

项目	累计面雨量	1时	2时	3时	4时	5时	6时	7时	8时	9时	10时	11时	12时	13时	14时
Kriging	58.7	0	1.4	1.4	4.2	3.4	4.3	13.4	12.8	7.6	7.3	2.3	0.1	0.2	0.3
IDW	90.9	0	2.1	1.1	8	3.5	4	24.1	21.9	13.1	8.6	3.5	0.2	0.3	0.5
Thiessen	109.6	0	2.9	1.5	10.5	3.8	4.2	29.2	27.6	16.1	8.8	4.1	0	0.4	0.5
CMPAS	100.7	0	3.4	2.4	10.8	3.9	5.4	24.7	24.7	14.3	6.3	3.4	0.6	0.4	0.4

为了验证面雨量估算结果的可靠性，利用未参与面雨量估算的气象站逐时降水数据（其中射月沟水库雨量站为31日01时～09时），提取每站点相对应的逐时降雨估算值，得出面雨量相关系数值在0.76～0.97之间，均通过信度0.05的检验，相关性较好（表3）。3种插值法的估算结果与实况比较，相关系数均在0.75以上，均方根误差均超过了2.23；而CMPAS面雨量值与实况值间的相关系数以及决定系数都高于空间插值法的估算值，表现最优。

表3　面雨量估算值与地面观测值的相关性分析

Tab. 3　Correlation analysis between estimations and observations

	相关系数*P*	决定系数R^2	均方根误差*RMSE*
Kriging	0.76	0.58	2.25
IDW	0.84	0.71	2.23
Thiessen	0.80	0.64	2.80
CMPAS	0.97	0.94	1.15

2.2　射月沟水库上游降水汇水量分析

为进一步讨论面雨量对流域汇水量的影响，基于Floodarea模型分别将Thiessen、IDW、Kriging和CMPAS的逐时面雨量作为输入因子，通过累计汇水量计算公式，得出射月沟水库上游降水汇水量与洪峰流量变化图（图3）。

由射月沟水库上游累计汇水量变化图（图3 a）可知：4种面雨量计算所得此次强降水在射月沟水库上游累计汇水量为1.47×10^7～2.89×10^7 m^3，达到射月沟水库总库容（6.70×10^6 m^3）的2.2～4.3倍；从洪水增长趋势得知，07～10时为山洪暴涨时段，这与射月沟流域自动雨量观测站的小时暴雨强度一致，3 h最大汇水量在1.08×10^7～1.86×10^7 m^{3}之间。从洪峰流量变化趋势均可以明显看出（图3b），7月31日02时～14时出现两个峰值，第一个山洪高峰出现在05时，第二个峰值出现在08时，其中由Thiessen最大洪峰流量达2 039 m^3·s^{-1}，而Kriging最

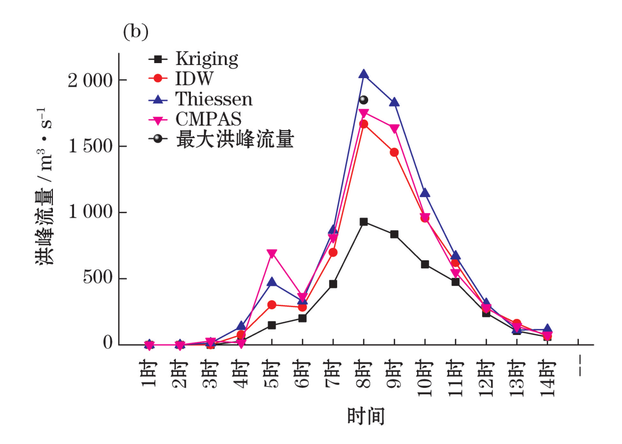


图3　射月沟水库上游降水汇水量与洪峰流量曲线图

Fig. 3　Curves of water-collecting amount and the flood peak flow in the upper reaches of Sheyuegou reservoir

大洪峰流量为928 $m^3·s^{-1}$。根据水利部门灾后调查的最大洪峰流量（1 848 $m^3·s^{-1}$）与CMPAS最大洪峰流量（1 756 $m^3·s^{-1}$）相比，两者误差最小，精确度达到95%。通过面雨量和最大洪峰量的结果验证，多源融合降水产品（CMPAS）的估算结果的可靠性和精确性表现最优，由此推断此次射月沟水库上游区山洪累计汇水总量达到$2.64×10^7$ m^3。

2.3 射月沟水库上游洪水入库分析

图4是基于CMPAS的射月沟水库上游的汇水量变化过程。射月沟水库总库容为$6.70×10^6$ m^3，溢洪道最大洪峰流量为380 $m^3·s^{-1}$，水库可以蓄水$8.07×10^6$ m^3，并保持正常运行，7月31日02时水库库容量为$4.04×10^6$ m^3。通过累计汇水量与水库溢洪道开始溢洪、洪水漫坝时间推算，当洪水入库水量到$2.66×10^6$ m^3时，溢洪道开始溢洪（7时35分，调查时间，以下同），从累计汇水量达到这一量值的时间段在7月31日05时左右，相差约2 h 35 min；当洪水入库水量到$4.03×10^6$ m^3时，水库开始漫坝（8时左右），而累计汇水量达到这一量值约为06时10分，相差1 h 50 min。由此推断，从射月沟水库上游汇水量形成山洪最后到达水库的时间可能需要2 h左右。当水库漫坝发生近1 h 45 min时，大坝发生溃口（9时47分），此时洪水超过大坝顶2 m（现场调查数据），估计洪水入库量可能达到了$1.32×10^7$ m^3。值得注意是水库大坝形成溃口后，射月沟水库上游仍有约$1.30×10^7$ m^3洪水从大坝溃口流向下游。

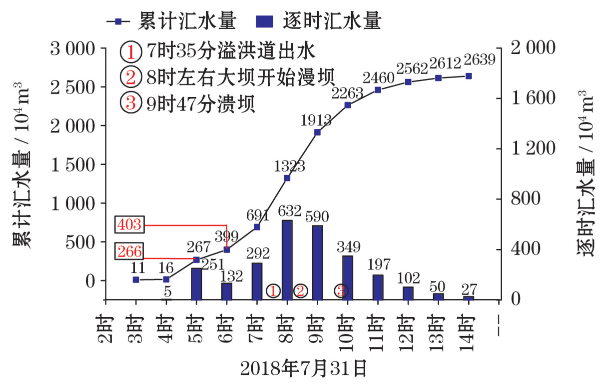


图4 基于CMPAS的射月沟水库上游逐时汇水量变化图

Fig. 4 Based on CMPAS of the curve of the water-collecting amount in the upper reach of Sheyuegou reservoir

3 结 论

山地小流域面雨量的估算，在缺少加密降水观测站网的情况下，可利用小流域周边降水站网数据采用不同插值方法计算流域逐时面雨量，也可采用国家气象信息中心生产的多源融合降水逐时产品。通过对4种面雨量估算及相关分析及验证，CMPAS面雨量相关系数、决定系数为0.97、0.94为最大，均方根误差为1.15为最小，CMPAS面雨量优于其他3种插值法，表现为最优。

基于4种面雨量驱动Floodarea模型得出的汇水量在$1.47×10^7$～$2.89×10^7$ m^3之间，最大洪峰流量在928～2 039 $m^3·s^{-1}$之间，结果差异明显。CMPAS估算水库上游的最大洪峰流量1 756 $m^3·s^{-1}$，与水利部门事后调查的最大洪峰流量为1 848 $m^3·s^{-1}$相比，精确度达到95%，由CMPAS得到的射月沟水库上游暴雨山洪总水量可能为$2.64×10^7$ m^3，远超该水库的防洪库容和溢洪承载能力。

使用CMPAS面雨量计算的汇水量与灾后调查的水库溢洪、漫坝和溃口调查时间进行分析对比，汇水量与实际洪水入库有一定的滞后性，可能与降水强度分布以及山顶汇流到达水库的时间等有关；虽然能推算出射月沟水库上游的洪水致水库溃口的汇水总量，但由于面雨量驱动Floodarea模型的时间步长为小时，还不能更为精准地推演分钟时段洪水量影响水库过程。

受限于水文资料的验证、以及DEM的精度、产流等多方面因素影响，Floodarea模型模拟得到汇水量可能存在偏差，精准反演小流域暴雨山洪的面雨量、汇水量等山洪灾害防御关键技术是今后需要不断完善的工作。

致谢：感谢国家气候中心陆波博士对本文写作的悉心指导，感谢武汉区域气候中心和哈密市气象局的支持与帮助。

参考文献（References）

[1] 周顺武，王传辉，吴萍，等. 青藏高原强降水日数的时空分布特征[J]. 干旱区地理，2012，35（1）：23－31.［ZHOU Shunwu，WANG Chuanhui，WU Ping，et al. Temporal and spatial distribution of strong precipitation days over the Tibetan Plateau［J］. Arid Land Geography，2012，35（1）：23－31.］

[2] 曹永强，张亮亮，王学凤，等. 辽宁省夏季降水量和极端雨量日时空变化特征分析[J]. 干旱区地理，2017，40（2）：266－275.［CAO Yongqiang，ZHANG Lianglaing，WANG Xuefeng，et al. Characteristics of spatio-temporal variation of summer precipitation and extreme rainfall days in Liaoning Province in recent 54

years[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 266 – 275.]

[3] WU Shiangjen, HSU Chintsung, LIEN Hocheng, et al. Modeling the effect of uncertainties in rainfall characteristics on flash flood warning based on rainfall thresholds[J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 1677 – 1711.

[4] 谢泽明,周玉淑,杨莲梅. 新疆降水研究进展综述[J]. 暴雨灾害,2018,37(3):204 – 212.[XIE Zeming, ZHOU Yushu, YANG Lianmei. Review of study on precipitation in Xinjiang[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(3): 204 – 212.]

[5] 周惠成,宋天宇,吴剑. 山丘区小流域暴雨洪水预报预警问题分析及建议[J]. 中国防汛抗旱,2016,26(5):52 – 53. [ZHOU Huicheng, SONG Tianyu, WU Jian. Analysis and suggestions of the rainstorm and flood warning and forecasting of small watershed in hill district[J]. China Flood and Drought Management, 2016, 26(5): 52 – 53.]

[6] NORBIATO, DANIELE, BORGA. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins[J]. Journal of Hydrology, 2008, 362(3): 274 – 290.

[7] 郭良,丁留谦,孙东亚,等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报,2018,49(9):101 – 114.[GUO Liang, DING Liuqian, SUN Dongya, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 101 – 114.]

[8] 张红萍. 山区小流域洪水风险评估与预警技术研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2013.[ZHANG Hongping. Study on the flood risk management and technology of the small mountain watershed[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.]

[9] MICHAUD J, SOROOSHIAN S. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed[J]. Water Resources Re-search, 1994, 30(3): 593 – 605.

[10] 张雪松,郝芳华,张建永. 降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究,2004,11(1):9 – 12. [ZHANG Xuesong, HAO Fanghua, ZHANG Jianyong. Study on effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on runoff and sediment modeling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1): 9 – 12.]

[11] 章国材. 暴雨洪涝预报与风险评估[M]. 北京:气象出版社,2012:119 – 125.[ZHANG Guocai. Forecast and risk assessment of rainstorm flood[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 119 – 125.]

[12] 肖安,许爱华. 2016年华南地区一次大暴雨过程的空报原因分析[J]. 暴雨灾害,2018,37(2):124 – 134. [XIAO An, XU Aihua. Cause analysis on false prediction of an extreme heavy rain event in southern China in 2016[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(2): 124 – 134.]

[13] 韩平,程先富. 洪水灾害损失评估研究综述[J]. 环境科学与管理,2012,37(4):61 – 64.[HAN Ping, CHENG Xianfu. Review on flood loss evaluation[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(4): 61 – 64.]

[14] 赵战成. 库尔勒一次强对流大暴雨天气特征分析[J]. 干旱区地理,2016,39(5):1070 – 1077. [ZHAO Zhancheng. Characteristics of a strong convective weather and heavy rainstorm in Korla City, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(5): 1070 – 1077.]

[15] 张连成,江远安,刘精,等. 基于FloodArea模型新疆山洪淹没模拟及致灾临界雨量阈值的研究——以皮里青河流域为例[J]. 干旱区地理,2018,41(1):48 – 55. [ZHANG Liancheng, JIANG Yuan'an, LIU Jing, et al. Mountain flood simulation and critical rainfall threshold incurring disaster based on the Floodarea model: A case of Piliqing River Valley as an example[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 48 – 55.]

[16] 潘旸,沈艳,宇婧婧,等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面—卫星—雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报,2015,73(1):177 – 186. [PAN Yang, SHEN Yan, YU Jingjing, et al. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method[J]. Acta Meteorological Sinica, 2015, 73(1): 177 – 186.]

[17] 宇婧婧,沈艳,潘旸,等. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估[J]. 气象学报,2015,73(2):394 – 410. [YU Jingjing, SHEN Yan, PAN Yang, et al. Comparative assessment between the daily merged precipitation dataset over China and the world's popular counterparts[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(2): 394 – 410.]

[18] GEOMER. Floodarea: Arc view extension for calculating flooded area (User manual Version 2.4)[M]. Heidelberg: Geomer Gmph, 2003.

[19] 张明达,李蒙,戴丛蕊,等. 基于FloodArea模型的云南山洪淹没模拟研究[J]. 灾害学,2016,31(1):78 – 82. [ZHANG Mingda, LI Meng, DAI Congrui, et al. Simulation Study of Flood in Yunnan based on the FloodArea Model[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 78 – 82.]

[20] 张容焱,游立军,高建芸,等. 统计方法与淹没模型结合的山洪灾害风险评估方法及其应用[J]. 气象,2013,39(12):1642 – 1648. [ZHANG Rongyan, YOU Lijun, GAO Jianyun, et al. Flash floods disaster risk assessment method combination of statistical and inundated model and its application[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(12): 1642 – 1648.]

[21] 罗尊骅,林广发,张容焱,等. FloodArea模型糙率系数改进方法[J]. 海南师范大学学报(自然科学版),2018,31(1):98 – 104. [LUO Zunhua, LIN Guangfa, ZHANG Rongyan, et al. An improved method of calculating roughness coefficient for Floodarea[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2018, 31(1): 98 – 104.]

[22] 许多涛,李晓. 四川都江堰市白依庵泥岩矿区水文地质条件及最大汇水量评估[J]. 水土保持研究,2006,13(3):184 – 186. [XU Duotao, LI Xiao. Assessment of hydrogeological conditions and the largest water-collecting amount in Baiyian Mudstone Mining Area, Du jiangyan, Sichuan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 184 – 186.]

Estimation and application of water-collecting amount during an extreme heavy rainfall induced flash flooding in Hami City on 31st July 2018

WANG Mei-xia, ZHANG Tai-xi, YU Xing-jie, ZHANG Lian-cheng, ZHANG Xu
(*Xinjiang Climate Center*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: In order to mitigate the flooding disasters induced by severe rainfall over mountain regions, it is very important to estimate the water collection amount. However, in arid mountain regions, meteorological and hydrological stations are usually scarce and unevenly distributed, leading to difficulties in the estimation of this parameter. In such cases, a reasonable estimation of the areal rainfall is necessary and offers the initial conditions for driving hydrological models. In this paper, we studied an extreme rainfall event that occurred in Hami City, Xinjiang, China on July 31, 2018 and that resulted in the break of a local dam. The northeastern part of Hami corresponds to the easternmost area of the Tianshan Mountains. This area is characterized by very hot summers and an annual mean precipitation of 43 – 118 mm. Due to a lack of vegetation, flooding disasters occur frequently along the hilly southern slope of this area; nevertheless, local meteorological and hydrological stations are rare. On July 31, 2018, from midnight to 13:00, an extreme rainfall event occurred over northeastern Hami and led to a severe flood. This caused the break of the Sheyuegou Reservoir and, consequently, the death of many people. In this paper, the areal rainfall, water collection amount, and breaking process of the local dam were objectively evaluated. In order to obtain a reasonable estimation of the areal rainfall, three interpolation methods were applied to the meteorological station data, together with a multi-source fusion data reanalysis. Overall, the four estimation methods demonstrated correlations between 0.76 – 0.97; notably, the best estimation was given by the multi-source fusion data reanalysis. The estimated areal rainfall was then used to drive the FloodArea Model, obtaining the water collection amount for the upper reach of the Sheyuegou Reservoir: the values varied between 1.471×10^7 m^3 and 2.892×10^7 m^3. The water collection amount obtained by using the CMPAS areal rainfall was further compared with the results of a post-disaster investigation on the dam breaking process. The calculated hourly water collection amount and the flood peak flow were in good agreement with the results of the post-disaster investigation. In particular, the flood peak flow was 1.756×10^3 $m^3\cdot s^{-1}$ (very similar to that derived from hydrological observations), while the total flood charge was 2.639×10^7 m^3 (much higher that the flood control and spillway carrying capacities of the reservoir).

Key words: heavy rain; areal rainfall; water-collecting amount; Floodarea; Hami City